

III-107 - AVALIAÇÃO DA CAMADA DE COBERTURA FINAL DE ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS COM A UTILIZAÇÃO DO MODELO VADOSE - RESULTADOS INICIAIS

Taísa Ferreira Lopes dos Santos⁽¹⁾

Mestre em Engenharia Ambiental UERJ, 2009 e Engenheira Civil pela UERJ, 2006.

Isabela Maria Barroso

Mestre em Engenharia Ambiental UERJ, 2008 e Engenheira Civil pela Gama Filho.

Marcus Antonio Ventura

Engenheiro Civil pela UERJ, 2008. Engenheiro da Limpatec.

Elisabeth Ritter

D.Sc. em Engenharia Civil – PEC/COPPE/UFRJ e M.Sc. em Engenharia Civil – PUC/RIO. Professora Adjunta do Depto de Eng. Sanitária e do Meio Ambiente – Faculdade de Engenharia - UERJ

Endereço⁽¹⁾: Rua 150, nº244. Camboinhas - Niterói - RJ CEP: 24358-000- Brasil -Tel. 21-78684853 e-mail: taisafls@ig.com.br

RESUMO

Neste trabalho é estudado o solo já utilizado como camada de cobertura do Aterro Morro do Céu chamada de jazida antiga, e este mesmo solo com adição de 5% de bentonita. Foram determinadas as curvas de retenção de água, pelo Método do Papel Filtro. O solo com adição de bentonita apresentou uma maior capacidade de retenção de água quando comparado com o solo puro. As simulações com o VADOSE evidenciaram esse aspecto quando indicaram volumes menores de entrada de líquido no Aterro utilizando uma camada de cobertura com solo e bentonita. Adicionalmente a taxa de evaporação também será maior com esse material. A presença de gramínea na simulação com camadas evapotranspirativas indicou a baixa eficiência desse vegetal.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro Sanitário, Solos Não Saturados, Camada de Cobertura, Curva de Retenção de Água, Aterro Morro do Céu, VADOSE/W.

INTRODUÇÃO

A disposição adequada de resíduos sólidos urbanos ou industriais, como o uso de aterros, continua sendo um dos grandes desafios dentro do saneamento básico. Levando em consideração o elevado potencial poluidor dos gases e do chorume gerado no processo de biodegradação dos resíduos sólidos urbanos (RSU), torna-se claro a necessidade urgente do encerramento dos lixões e da implantação de uma quantidade significativa de novos aterros sanitários com um sistema eficiente de drenagem de gases e de chorume, um monitoramento contínuo e um sistema de camada de cobertura final bem executado e projetado, a fim de prevenir possíveis migrações de gases pelas fronteiras das células do aterro e de chorume pela base e lateral do mesmo. O controle da migração do percolado é fundamental para minimizar seus impactos no meio ambiente e o volume deste pode ser reduzido com um sistema eficiente de cobertura final e de drenagem após o encerramento do aterro.

Após o término do período de vida útil de um aterro sanitário, isto é, após o encerramento das atividades de recebimento e aterramento dos resíduos, os aterros deverão receber uma camada de cobertura final que irá interagir diretamente com a atmosfera, como exemplo a camada evapotranspirativa, que para seu projeto necessita da quantificação dos processos atmosféricos na superfície do solo e do fluxo de água através de solos não-saturados (ZORNBERG & MCCARTNEY, 2006).

Neste contexto, se insere a importância do projeto, da construção e do monitoramento bem executados das camadas de cobertura final das células encerradas de aterros sanitários, cuja principal função é de controlar a percolação para a base do aterro através da minimização da infiltração de águas pluviais e a conseqüente geração de chorume, acomodar os recalques diferenciais provenientes do processo de degradação da matéria orgânica presente na massa de resíduos e minimizar a migração de gases para a atmosfera, ou seja, seu principal objetivo é minimizar os impactos ambientais provenientes da disposição dos resíduos sólidos urbanos.



No estado do Rio de Janeiro, a maioria dos municípios ainda encaminha seus resíduos urbanos para lixão. O Aterro Morro do Céu, localizado no bairro do Caramujo, em Niterói é um aterro controlado operado desde 1983 pela Companhia de Limpeza Urbana de Niterói (CLIN). O Aterro possui uma área de 200.000 m², atendendo uma população de 474.002 habitantes (IBGE, 2008) e recebendo cerca de 800 toneladas de resíduos por dia. O lixiviado desse aterro segue através de rede coletora para a ETE de Icaraí, onde a relação volume de chorume/volume de esgoto é menor do que 1% (Ferreira et al., 2008). A vida útil do Aterro Morro do Céu está se encerrando e a definição de uma camada de cobertura adequada, de modo que minimize o volume de lixiviado a ser tratado na ETE, além das questões referentes à migração de gás, tem relevância.

OBJETIVO

O trabalho tem o objetivo geral avaliar a eficácia, através de experimentos de laboratório, do solo já usado como camada de cobertura no aterro Morro do Céu e este mesmo solo com adição de 5% de bentonita. Os objetivos específicos são:

- 1) determinação da curva de retenção de água (teor de umidade x sucção) desses solos;
- 2) modelagem computacional utilizando o programa VADOSE/W com a inserção dos parâmetros determinados em laboratório, simulando para os dois solos, camadas monolíticas e camadas evapotranspirativas.

CAMADAS DE COBERTURA

Um sistema de cobertura final de aterro pode ser composto de seis componentes básicos: camada superficial, camada de proteção, camada de drenagem, barreira hidráulica ou de gás, camada de coleta de gás e camada de base. No entanto, a utilização simultânea desses componentes para os sistemas de cobertura final muitas vezes é inviável ou não necessária, dependendo basicamente da condição climática e do balanço hídrico do local. Assim, se definem alguns tipos de camadas: monolíticas, barreira capilar e camadas evapotranspirativas.

Em geral, é adotada uma camada de cobertura monolítica, onde um solo local é compactado com espessura em torno de 60 cm. Nesse sistema de cobertura é recomendada a compactação de uma camada de solo argiloso, com baixa permeabilidade saturada (valor menor ou igual a 10^{-9} m/s) diretamente sobre a massa de resíduos. Esse sistema também é denominado de resistivo (ZORNBERG ET AL., 2003). A camada compactada tem como objetivo evitar a penetração excessiva de precipitação; porém pode apresentar alguns problemas, tais como ressecamento e formação de fissuras e trincas, quando utilizadas em alguns tipos de climas.

A barreira capilar simples funciona como barreira hidráulica para controlar a infiltração da água na superfície do aterro. Esses sistemas são construídos com uma camada de solo de granulometria fina (silte ou argila) sobre uma camada de material granular (areia ou cascalho). Essa diferença da granulometria leva a intensificação do fenômeno de capilaridade. A capacidade de impedir o fluxo de água ocorre devido à grande mudança nos tamanhos dos poros entre as camadas de materiais mais finos e mais grosseiros. As barreiras capilares têm a finalidade de aumentar a capacidade de armazenamento de água na camada de material mais fino, pois elas usam o contraste dos valores de permeabilidade entre solos finos e granulados e melhora a habilidade do solo fino reter umidade. Elas só têm funcionalidade na condição de não saturação do sistema.

Camadas evapotranspirativas são sistemas vegetados com plantas nativas capazes de resistir e sobreviver às condições locais. O princípio das camadas evapotranspirativas é a utilização do solo local com capacidade de armazenar água de precipitação pluviométrica, de modo que esta seja evapotranspirada através da vegetação nativa, e a sua infiltração no aterro não ocorra. As camadas evapotranspirativas, segundo Zornberg et al (2003), não atuam como barreira resistiva, mas são como uma esponja que armazena umidade durante a precipitação e devolve para a atmosfera o através da evapotranspiração. Projetos de sistemas de cobertura evapotranspirativa são baseados no balanço hídrico de um aterro, o qual inclui capacidade de armazenamento de água do solo, precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração e infiltração. Desta maneira, siltes e argilas de baixa plasticidade são os solos mais usados em coberturas evapotranspirativas, porque são capazes de armazenar água ao mesmo tempo em que minimizam a ocorrência de potenciais rachaduras e trincas devido ao ressecamento do solo (ZORNBERG ET AL., 2003). Neste sentido, avaliar as condições de umidade e de sucção da camada de cobertura é de grande relevância.



METODOLOGIA

Foram coletadas amostras deformadas (Amostra 01) da jazida já usada como camada de cobertura, dentro da área do Aterro Morro do Céu, com auxílio de pá, colocadas em sacos plásticos e levadas para o Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Também foi estudado este solo com adição de 5% de bentonita, nomeado como Amostra 02. A bentonita adicionada é comercializada pela Bentonit União Nordeste S.A.

Foram realizados ensaios de caracterização conforme a NBR 7181/1984, limites de Atterberg conforme NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984 e determinação da densidade real dos grãos conforme a norma DNER-ME 093/94 - Solos - Determinação da densidade real dos grãos. O ensaio de compactação tipo Proctor Normal, segundo a NBR 7182/1986, foi realizado para determinar a umidade ótima de compactação e da massa específica seca máxima do solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita, amostra 02. Foram usados como referência para os dados de compactação os resultados obtidos por Barroso (2008) que também estudou o solo da amostra 01.

O ensaio de permeabilidade de carga variável foi realizado a fim de verificar a influência da bentonita adicionada e a condutividade hidráulica do solo com adição de 5% de bentonita. Os resultados de permeabilidade obtidos por Barroso (2008) foram usados como referência para a amostra 01.

As curvas de retenção de água para as amostras 01 e 02 foram determinadas através do Método do Papel Filtro com contato direto com a amostra de acordo com a ASTM D 5298-03. O solo foi compactado na umidade ótima e dois anéis foram moldados com o solo da amostra 01, chamados de anel 4 e anel 5. Com a amostra 02, foram moldados três anéis, chamados de anel 1, anel 2 e anel 3.

Após a moldagem dos corpos de prova em anéis, os mesmos foram levados a uma umidade próxima a saturação com o auxílio de uma pipeta. Em seguida, foi colocado um papel filtro em cada lado da amostra com auxílio de uma pinça metálica e todo o conjunto, corpo de prova e papéis filtro, foi envolto por papel filme e papel alumínio e foram colocados, na posição vertical, dentro de duas caixas de isopor separadas. O período de equalização entre o papel filtro e a amostra foi de sete dias. Após esse período, as amostras foram retiradas das caixas de isopor e foram retirados o papel alumínio e o papel filme que envolviam o corpo de prova e o papel filtro foi retirado com uma pinça metálica e colocado dentro de uma cápsula metálica com tampa para serem pesados. Para a obtenção do peso do papel filtro, foi descontado o peso da cápsula vazia. Após a pesagem, os papéis filtro foram colocados na estufa por um período de sete dias, respeitando o tempo mínimo de 24 horas exigido pela norma. Após este período, os papéis filtro secos foram colocados rapidamente dentro das cápsulas e pesados novamente, a fim de se obter a umidade do papel filtro. Após a determinação da umidade do papel filtro, a sucção do solo foi calculada, de acordo com a curva de calibração do papel filtro proposta por Chandler et. al (1992), apresentada pelas equações 1 e 2.

$$\Psi = 10^{(6,05 - 2,48 \text{ Log } (w))} \quad \text{para } w > 47\% \quad (\text{eq. 1})$$

$$\Psi = 10^{(4,84 - 0,0622 w)} \quad \text{para } w \leq 47\% \quad (\text{eq. 2})$$

Onde:

Ψ : sucção (kPa)

w: umidade o papel filtro (%)

Para a determinação dos próximos pontos do ensaio, caso seja necessário, os corpos de prova são expostos ao ar e a variação do teor de umidade gravimétrica é controlada pelo peso do anel com a amostra, até atingirem a umidade desejada quando então o processo é repetido. Ensaios com placa de pressão e sucção também foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da USP, mas os resultados deverão ser publicados oportunamente.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Caracterização do solo

As curvas granulométricas obtidas para as duas amostras indicaram areia silto-argilosa para ambas, visto que, em sua composição há 60,0% de areia para a amostra 01 e 54 % para amostra 02. Há um aumento no percentual de solos finos na amostra 02, quando comparado ao ensaio da amostra 01, devido à adição de



bentonita. A tabela 1 apresenta os limites de Atterberg: Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP), e os resultados da densidade real dos grãos para as amostras 01 e 02. Nota-se o aumento significativo no índice de plasticidade (IP) e, conseqüente, trabalhabilidade da amostra 02 devido à adição de 5% bentonita.

Tabela 1: Limites de Atterberg e Densidade real dos grãos

Limites	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Densidade real dos grãos
Amostra 01	32	18	14	2,563
Amostra 02 com adição de 5% de bentonita	57	22	35	2,567

Os resultados do ensaio de compactação do solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita (amostra 02) e os resultados obtidos por Barroso (2008) estão apresentados na tabela 2. O solo da amostra 02 possui uma umidade ótima superior aos valores obtidos por Barroso (2008), porém apresenta um valor menor de massa específica aparente seca máxima, o que evidencia o comportamento da bentonita, pois solos argilosos apresentam massas específicas secas máximas menores e umidades ótimas maiores quando comparado com siltes, areias e pedregulhos.

Tabela 2: Resultados dos ensaios de compactação (SANTOS, 2009)

Amostra	Umidade ótima (%)	Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)
Amostra 02 – Jazida antiga com adição de 5% de bentonita	14,1	1,760
Amostra nº 2 (BARROSO, 2008)	12,4	1,893

O valor de permeabilidade encontrado foi de $5,10 \times 10^{-8}$ cm/s amostra 02, o que caracteriza este solo como um solo adequado para ser usado como camada de cobertura, devido a sua baixa permeabilidade. De acordo com Barroso (2008), o valor da permeabilidade para o solo da jazida antiga foi de $2,85 \times 10^{-7}$ cm/s. Esse valor pode ser considerado como referência para a amostra 01. Torna-se claro a influência da adição da bentonita na condutividade hidráulica do solo estudado, pois o resultado da permeabilidade saturada para a amostra com bentonita foi dez vezes menor que o valor encontrado para a amostra pura.

Curva de retenção de água (teor de umidade gravimétrica x sucção)

A curva de retenção de água no solo determinada pelo Método do Papel Filtro para as amostras 01 e 02 estão apresentadas nas figuras 1 e 2, respectivamente.

Verifica-se uma tendência de comportamento similar para as duas curvas apresentadas na Figura 1.

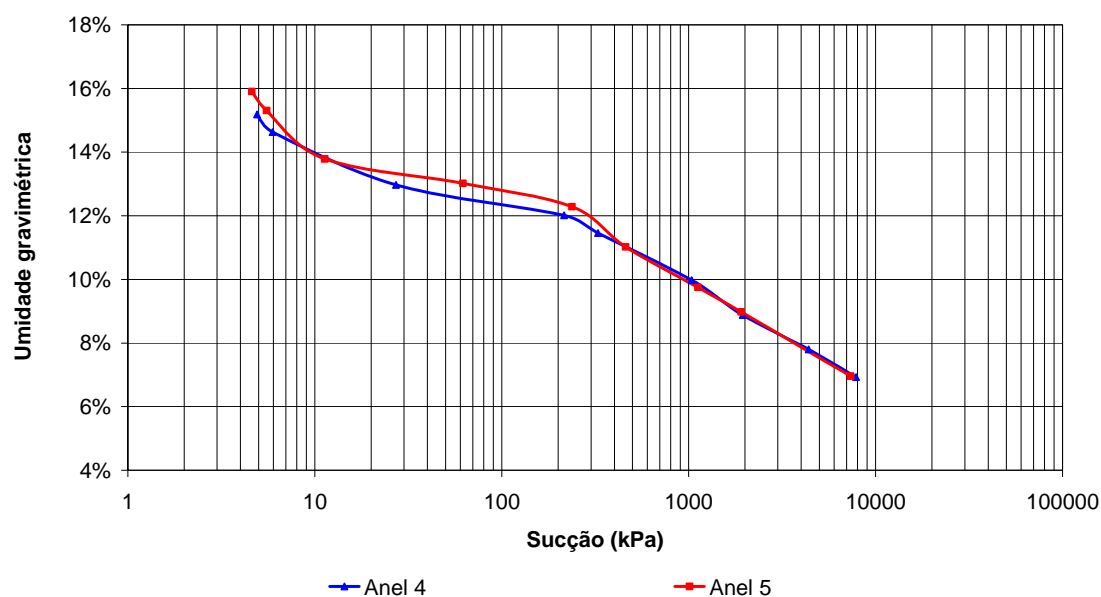


Figura 1: Curva de retenção de água da amostra 01 obtida pelo Método do Papel Filtro (SANTOS, 2009)

Observa-se uma diferença inicial para os valores de umidade com a curva do anel 3 apresentando uma sucção inicial maior que as outras. A curva do anel 3 se mantém com maior retenção de água no solo até a umidade de 14%, a partir daí as curvas seguem uma trajetória semelhante, conforme apresentado na Figura 2.

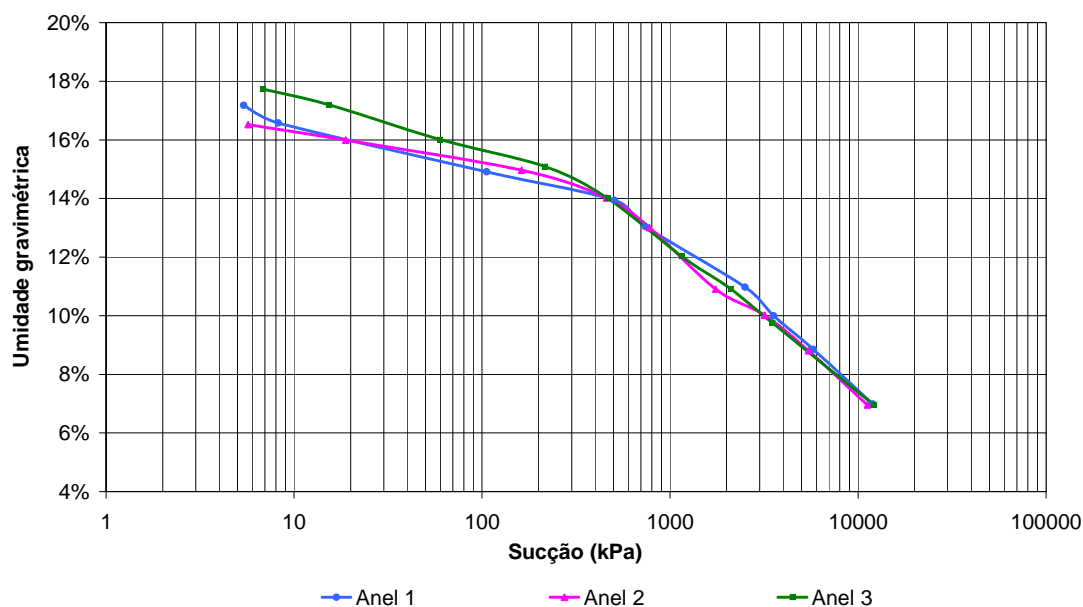


Figura 2: Curva de retenção de água da amostra 02 obtida pelo Método do Papel Filtro (SANTOS, 2009)

Pode-se notar uma maior capacidade de retenção de água pelos anéis da amostra 02, solo da jazida antiga com 5% de bentonita, devido à adição deste argilomineral, que possui uma grande superfície específica e, conseqüentemente, uma elevada força de adesão com a água. Tal fato explica a sua posição acima das curvas características da amostra 01, solo da jazida antiga puro. Como este solo é bastante arenoso, ele possui a maioria dos poros relativamente grandes e a água é retida com pouca energia, sendo assim, a uma dada sucção matricial muitos poros se esvaziam e poucos ainda podem reter água, por isso a sua posição inferior na figura 3.

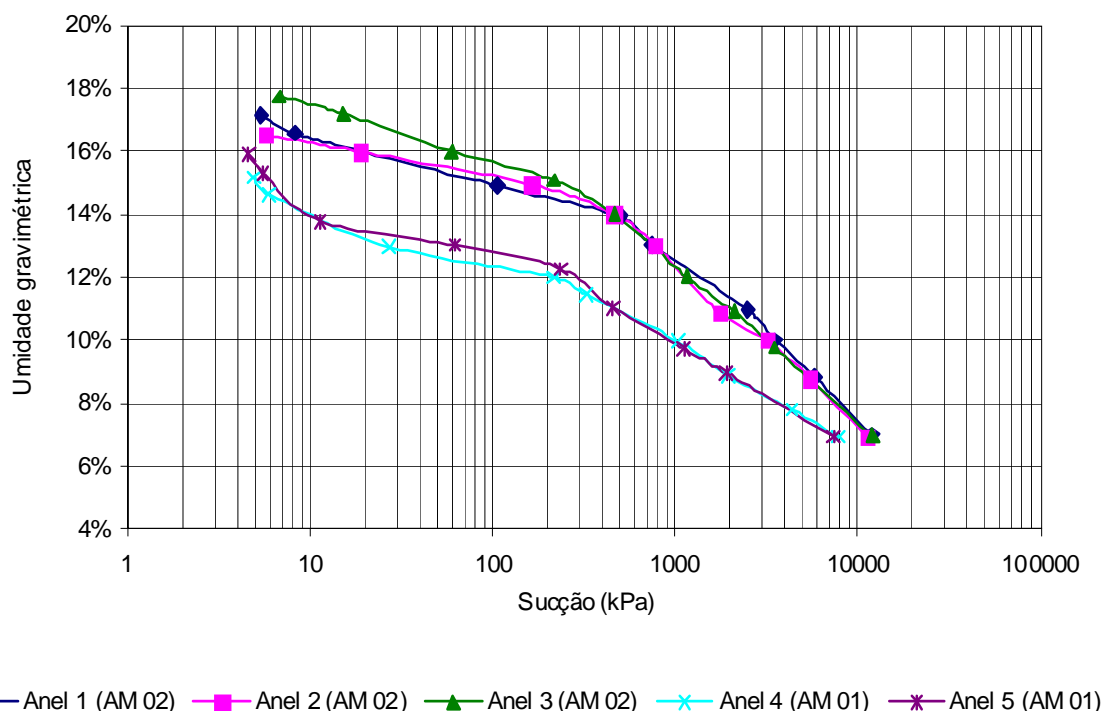


Figura 3: Comparativo das Curvas de retenção de água da amostra 01 (anel 4 e 5) e da amostra 02 (anel 1, 2 e 3) obtida pelo Método do Papel Filtro (SANTOS, 2009)

MODELAGEM NUMÉRICA ATRAVÉS DO VADOSE/W

VADOSE/W (Geo Slope, 2009) é um software de elementos finitos usado para analisar o fluxo de água que atravessa a superfície do solo para a zona não saturada e zona de fluxo subterrâneo. O software permite analisar problemas simples até os mais complexos, entre os quais projeto e monitoramento de um solo homogêneo ou heterogêneo usado como camada de cobertura de minas e aterros sanitários e determinação das taxas de infiltração, evaporação e transpiração de projetos de agricultura, irrigação ou sistemas naturais.

Para utilizar o VADOSE/W, o usuário deve definir a geometria gráfica, gerar a sua malha de elemento finito e, em seguida, definir a camada superficial e adicionar uma malha na mesma; especificar as propriedades dos materiais e os dados climáticos por colagem, importação ou digitação de dados; aplicar as condições de contorno associadas ao clima ou valores específicos de temperatura, pressão total ou unidade de fluxo de água, ou um potencial de infiltração superficial; definir a escala de dados automaticamente; e definir as condições iniciais para a análise desenhando o lençol freático e temperaturas nodais.

Os resultados da superfície do solo incluem: precipitação, radiação, evaporação potencial e real, *runoff*, infiltração, transpiração real e profundidade do gelo. Os resultados do balanço hídrico incluem: precipitação, *runoff*, fluxo da superfície, evaporação, armazenamento, balanço hídrico e transpiração das plantas. Os resultados da camada de cobertura incluem: volume do fluxo de líquido e de vapor, volume total em toda a camada e massa total de gás em toda a camada.

Foram realizadas 4 simulações de tipos de camada de cobertura no VADOSE/W:

- Camada de cobertura monolítica com o solo da amostra 01 (solo puro da jazida antiga)
- Camada de cobertura monolítica com o solo da amostra 02 (solo da jazida antiga com adição de 5% de bentonita)
- Para os dois tipos de solo foi com e sem vegetação adicionada vegetação (gramínea) caracterizando camada evapotranspirativa.

Devido à dificuldade de obtenção de dados (índice de área de folhas, taxa de crescimento das raízes, relação de crescimento com as estações do ano, respiração, dentre outros) da fisiologia vegetal de espécies nativas brasileiras, os dados referentes à graminia utilizada no experimento foram extraídos de uma base de dados do



próprio programa. A utilização de dados de espécies exóticas pode interferir diretamente no resultado apresentado, entretanto se configurou como a única alternativa viável para executar a modelagem computacional proposta.

A figura 4 apresenta o gráfico da precipitação acumulada durante 300 dias utilizando dados da Estação Meteorológica do Maracanã obtidas do Sistema de Meteorologia do Estado do Rio de Janeiro (SIMERJ). Esta estação foi escolhida, pois é a estação que está localizada mais próxima de Niterói e que possui dados anuais mais completos.

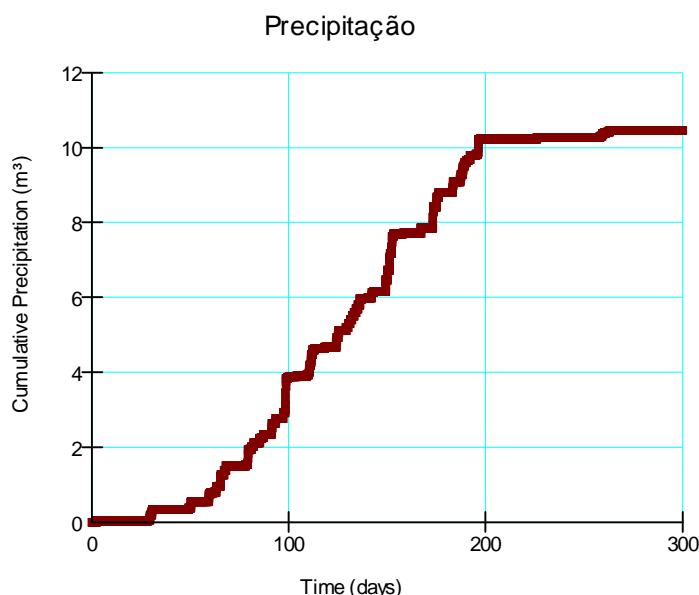


Figura 4: Precipitação acumulada ocorrida no local da camada de cobertura (SANTOS, 2009)

As figuras 5 e 6 apresentam os gráficos de armazenamento de água nas camadas do solo puro (amostra 01) e solo com adição de bentonita (amostra 02). Pode se verificar que o solo puro apresenta um fluxo de líquidos até o resíduo, ao longo dos 300 dias, da ordem de 580 m^3 , enquanto que o solo com bentonita apresenta um fluxo da ordem de 550 m^3 . A bentonita devido a sua propriedade de afinidade com água consegue executar melhor o "efeito esponja" conseguindo reter ao longo do tempo maior volume de líquidos, impedindo assim a entrada desses líquidos no aterro de resíduos.

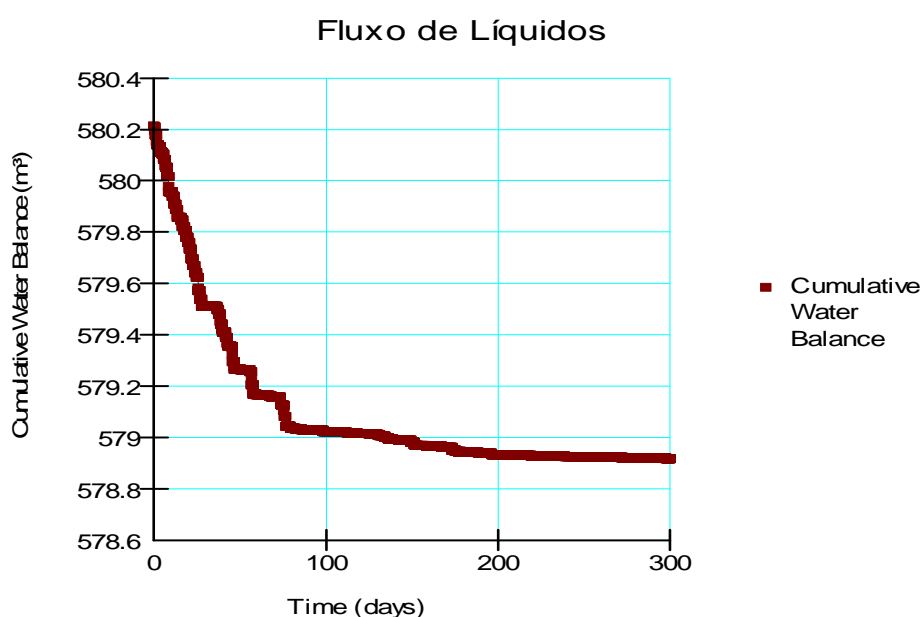


Figura 5: Armazenamento de água da camada monolítica composta pelo solo da amostra 01 (SANTOS, 2009)

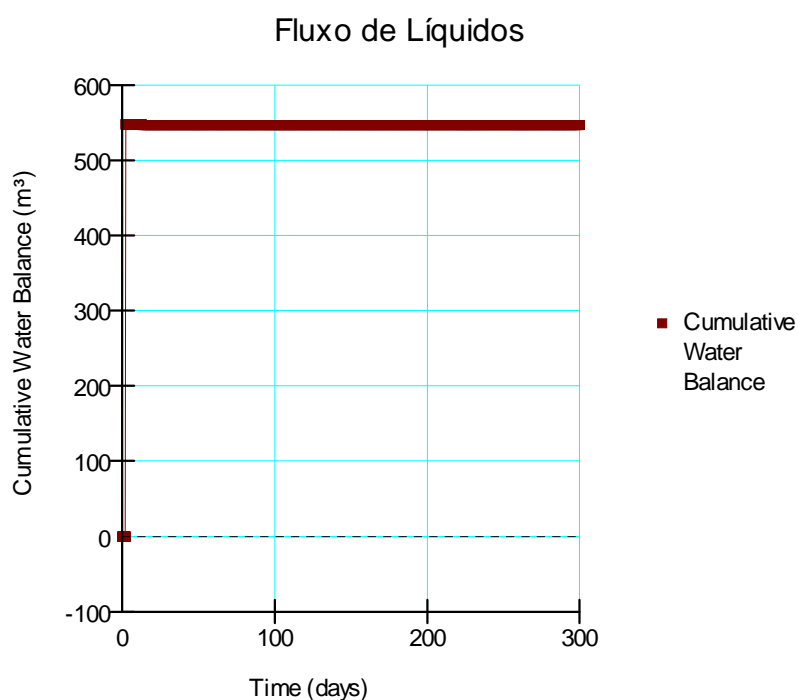


Figura 6: Armazenamento de água da camada monolítica composta pelo solo da amostra 02 (SANTOS, 2009)

Essa conclusão se evidencia no gráfico referente à evaporação real (figuras 7 e 8) onde o solo com adição de bentonita apresenta uma taxa de evaporação maior do que o solo puro, ou seja, devido ao fato do solo com bentonita possuir maior potencial de retenção de água, este solo consegue expor a água durante um período maior em contato com a atmosfera, favorecendo o processo de evaporação.

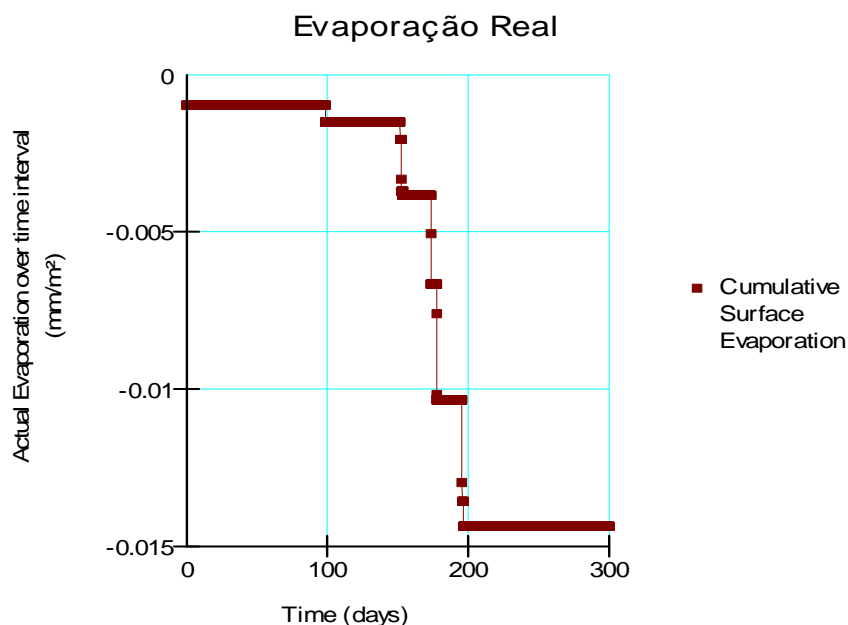


Figura 7: Taxa de evaporação real do solo composta pelo solo da amostra 01 (SANTOS, 2009).

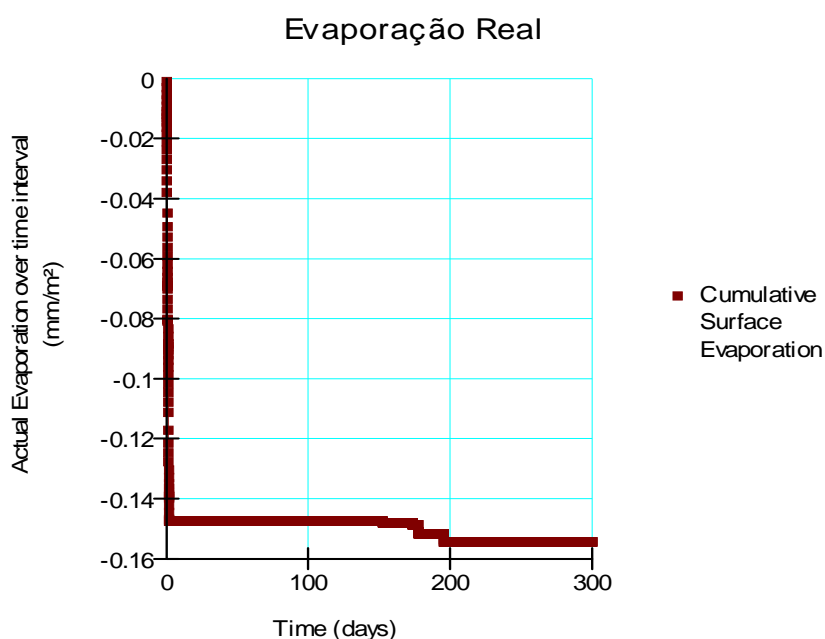


Figura 8: Evaporação da camada monolítica composta pelo solo da amostra 02 (SANTOS, 2009)

Quando se simula a camada evapotranspirativa com a presença da gramínea (figuras 9 e 10) esses valores diminuem da ordem de dez vezes comparando com o solo com bentonita e um pouco menores do que o solo puro, evidenciando que a eficácia da gramínea é muito baixa.

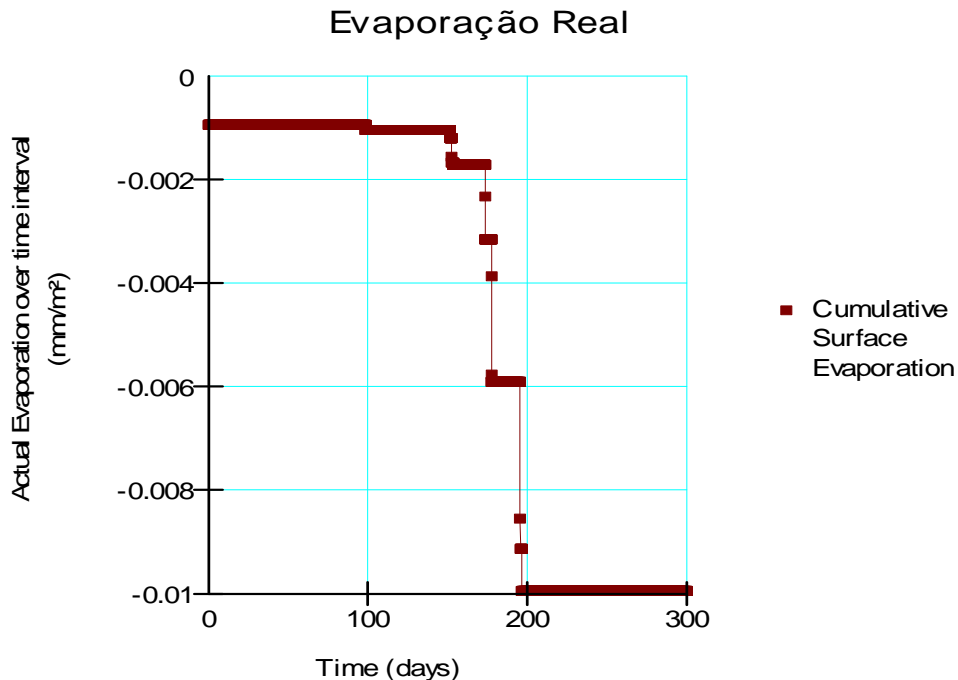


Figura 9: Evaporação da camada monolítica evapotranspirativa composta pelo solo da amostra 01 (SANTOS, 2009)

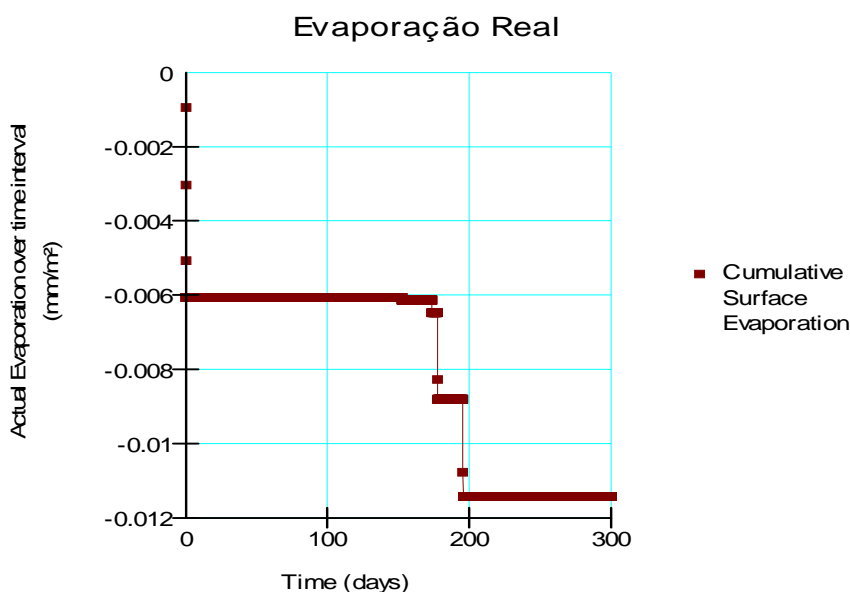


Figura 10: Evaporação da camada monolítica evapotranspirativa composta pelo solo da amostra 02 (SANTOS, 2009)

CONCLUSÕES

Tornou-se claro o comportamento da bentonita nas curvas de retenção de água obtidas pelo Método do Papel Filtro, pois o solo com a adição da mesma apresentou uma maior capacidade de retenção de água quando comparado com o solo puro. As simulações com o VADOSE evidenciaram esse aspecto quando indicaram volumes menores de entrada de líquido no Aterro utilizando uma camada de cobertura com solo adicionado de 5% de bentonita. Adicionalmente a taxa de evaporação também será maior com esse material. A presença de gramínea na simulação com camadas evapotranspirativas indicou a baixa eficiência desse vegetal. Pesquisas envolvendo vegetação brasileira são necessárias, de modo a quantificar de forma mais científica essa contribuição.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP e à Caixa Econômica Federal pelo financiamento e ao apoio do CNPq. Esse trabalho foi desenvolvido no escopo de um projeto de pesquisa integrante do Programa de Pesquisas em Saneamento Básico – PROSAB, Edital 5, Tema 3 – Resíduos Sólidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARROSO, I. M.,. Camadas de Cobertura de Aterro de Resíduos Sólidos: Estudo Preliminar de Casos. Dissertação de Mestrado. Programa de pos-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. UERJ. Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
2. CHANDLER, R. J., CRILLY, M.S., MONTGOMERY-SMITH, G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise-buildings. Proceeding of the Institute of Civil Engineering, N° 2, pp. 82-89. 1992
3. FERREIRA, J.A, EIGENHEER, E.M. e ADLER, R.R. Estudo de caso de Niterói – encerramento de aterro controlado e indicação de área para o novo Aterro da Cidade. Revista Mundo & Vida- Alternativas em Estudos Ambientais Volume 9 (1) p 15-22. Niterói, 2008.
4. GEO SLOPE. Disponível em <http://www.geo-slope.com/products/vadosew2007.aspx>.
5. SANTOS, T. F. L. Estudo Experimental da Camada de Cobertura do Aterro Morro do Céu, Niterói – RJ. Rio de Janeiro. 2009. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
6. ZORNBERG, M., LAFOUNTAIN, L., & CALDWELL, J.A., 2003. Analysis and Design of evapotranspirative Cover for hazardous Waste Landfill. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, no 6, pp. 427-438.